

Electromagnétisme et Relativité

J.M. Raimond
Laboratoire Kastler Brossel
Département de Physique de l'Ecole Normale Supérieure
jmr@physique.ens.fr

October 10, 2000

Table des Matières

1	Introduction générale	9
I	Mécanique analytique	15
1	Formulation lagrangienne	19
1.1	Description du système: coordonnées généralisées	19
1.2	Principe de moindre action	21
1.2.1	Enoncé	21
1.2.2	Equations de Lagrange	21
1.3	Expressions de la fonction de Lagrange	23
1.3.1	Particule unique libre	23
1.3.2	Système de particules interagissant par des forces dérivant d'un potentiel	24
1.3.3	Système de particules soumises à des forces extérieures	25
1.3.4	Lagrangien de particules chargées dans un champ	27
1.4	Généralisations	29
1.4.1	Forces ne dérivant pas d'une énergie potentielle	30
1.4.2	Cas des liaisons non holonomes	32
1.5	Lagrangien et lois de conservation	35
1.5.1	Invariance par translation dans le temps: énergie	36
1.5.2	Translation spatiale: conservation de l'impulsion	37
1.5.3	Invariance par rotation: moment cinétique	38
1.6	Action en fonction de la trajectoire	39
1.6.1	Dépendance en position	39
1.6.2	Dépendance en temps	40
1.7	Deux théorèmes utiles	41
1.7.1	Lois d'échelle	41
1.7.2	Théorème du Viriel	42
2	Formulation hamiltonienne	45
2.1	Equations de Hamilton	45
2.2	Crochets de Poisson	48
2.3	Action et hamiltonien	51
2.4	Transformations canoniques	52
2.4.1	Principe	52
2.4.2	Transformations canoniques et crochets de Poisson	54
2.4.3	Exemples de transformations canoniques	55
2.4.4	Transformations canoniques et espace des phases	56
2.4.5	Transformation générée par l'action et théorème de Liouville	58

Appendice 1	Modèle de Bohr	61
1.1	Un peu d'histoire	61
1.2	Modèle de Bohr	63
1.3	Au delà du modèle de Bohr	65
II	Relativité restreinte	69
1	Cinématique relativiste	73
1.1	Rappels de relativité galiléenne	73
1.1.1	Transformation de Galilée	73
1.1.2	Les difficultés de la cinématique classique	75
1.2	Principe de relativité	76
1.2.1	Enoncé	76
1.2.2	Deux expériences de pensée	76
1.3	Événements et intervalles	79
1.3.1	Événements	79
1.3.2	Intervalle. Invariance de l'intervalle	81
1.3.3	Conséquences de la conservation de l'intervalle. Causalité relativiste	82
1.3.4	Temps propre	82
1.4	Transformation de Lorentz	85
1.4.1	Forme de la transformation de Lorentz	85
1.5	Propriétés de la transformation de Lorentz	89
1.5.1	Composition des transformations	89
1.5.2	Vitesse, célérité et rapidité	90
1.5.3	Géométrie de la transformation de Lorentz	91
1.6	Conséquences de la transformation de Lorentz	92
1.6.1	Retour sur nos expériences de pensée	92
1.6.2	Intervalles et simultanéité	92
1.6.3	Loi de composition des vitesses	93
1.6.4	Contraction des longueurs	94
2	Notations Quadridimensionnelles	97
2.1	4-vecteur position d'un événement.	97
2.1.1	Coordonnées contravariantes	97
2.1.2	Coordonnées covariantes	99
2.1.3	Coordonnées covariantes, contravariantes et dualité	100
2.1.4	Changement de référentiel, changement de base	100
2.2	Autres 4-vecteurs	104
2.2.1	Définition	104
2.2.2	4-vitesse, 4-impulsion, 4-accélération	104
2.2.3	Densité de courant	105
2.2.4	Vecteur d'onde	106
2.3	Tenseurs	107
2.3.1	Tenseurs contravariants	108
2.3.2	Tenseurs covariants, tenseurs mixtes	108
2.3.3	Vocabulaire et exemples	109
2.4	Dérivation et analyse vectorielle	110
2.4.1	Dérivation	111
2.4.2	Analyse vectorielle	111

2.4.3	Intégration	112
3	Dynamique relativiste	115
3.1	Particule Libre	115
3.2	Energie-impulsion	118
3.3	Particule soumise à une force	119
3.4	Conservation de l'énergie-impulsion. Application aux collisions	120
3.4.1	Seuil de réaction	121
3.4.2	Effet Compton	122
4	Electromagnétisme relativiste	125
4.1	Particule libre dans un champ imposé	126
4.1.1	Equations de Lagrange	126
4.1.2	Tenseur champ électromagnétique	128
4.1.3	Force de Lorentz	129
4.1.4	Changements de référentiels pour le champ	131
4.1.5	Invariants du champ électromagnétique	132
4.1.6	Premier groupe d'équations de Maxwell	133
4.2	Champ en fonction des sources	134
4.2.1	Interaction champ-courant	135
4.2.2	Lagrangien du champ	136
4.2.3	Equations de Lagrange	136
4.2.4	Equations de Maxwell	137
4.3	Energie-impulsion du champ	138
4.3.1	Tenseur énergie-impulsion	138
4.3.2	Lois de conservation. Interprétation	139
4.3.3	Applications	142
III	Propagation, diffraction	145
1	Potentiels retardés	149
1.1	Fonction de Green	149
1.1.1	Position du problème	149
1.1.2	Définition de la fonction de Green	150
1.1.3	Approche qualitative	151
1.2	Solution rigoureuse	152
1.2.1	Fonction de Green	152
1.2.2	Forme covariante	155
1.2.3	Potentiels retardés	155
2	Diffraction: approche théorique	157
2.1	Formule de Kirchhoff	158
2.2	Principe de Huygens	159
2.3	Diffraction de Fraunhofer	163
2.3.1	Approximation paraxiale	163
2.3.2	Différentes expressions de la figure de diffraction	164
2.3.3	Généralisation à une transparence arbitraire	165
2.3.4	Propriétés générales de la figure de diffraction	165
2.3.5	Quelques exemples	166

3 Applications de la diffraction	169
3.1 Pouvoir de résolution des instruments d'optique	169
3.2 Traitement optique du signal	171
3.2.1 Filtrage spatial	171
3.2.2 Méthode de Labeyrie	173
3.3 Holographie	176
3.3.1 Principe	176
3.3.2 Applications	178
3.3.3 Holographie et conjugaison de phase	179
3.4 Limite de l'optique géométrique	180
Appendice 1 Jauges	183
Appendice 2 Espace réciproque	185
2.1 Espace réciproque	185
2.1.1 Transformation de Fourier	185
2.1.2 Champs longitudinaux et transverses	186
2.2 Variables normales	187
2.2.1 Electromagnétisme dans l'espace libre	188
2.2.2 Dynamique des variables normales	188
2.2.3 Décomposition en ondes planes	189
Appendice 3 Faisceaux gaussiens	191
3.1 Construction d'un mode gaussien	191
3.2 Propriétés essentielles	194
3.3 Cavités laser	196
3.4 Optique gaussienne	199
Appendice 4 Approximation eikonale	201
4.1 Eikonale	201
4.2 Approximation de l'optique géométrique	203
4.2.1 Equation de l'eikonale	203
4.2.2 Notion de rayon lumineux	204
4.3 Equation des rayons lumineux	205
4.3.1 Rayons et eikonale	205
4.3.2 Applications	206
4.3.3 Principe de Fermat	207
IV Sources du champ électromagnétique	209
1 Rayonnement d'une particule en mouvement	213
1.1 Potentiels de Liénard–Wiechert	213
1.2 Champs rayonnés	217
1.2.1 Dérivées utiles	218
1.2.2 Champ électrique	219
1.2.3 Champ magnétique	220
1.2.4 Discussion physique	220
1.3 Réaction de rayonnement	223
1.3.1 Approche qualitative	223
1.3.2 Force de réaction de rayonnement	224

1.3.3	Application	225
1.4	Rayonnement du dipôle	227
1.4.1	Champs rayonnés	227
1.4.2	Champs à une distance arbitraire	232
2	Développement multipolaire du champ rayonné	237
2.1	Développement multipolaire du potentiel vecteur	237
2.1.1	Notations	237
2.1.2	Potentiel vecteur	239
2.2	Termes multipolaires	240
2.2.1	Ordre 0: Dipôle électrique	240
2.2.2	Ordre 1: Dipôle magnétique, Quadripôle électrique	241
2.3	Applications: quelques problèmes de rayonnement	248
2.3.1	Rayonnement d'une charge oscillante	248
2.3.2	Antennes	250
3	Sources atomiques de rayonnement	255
3.1	Modèle de Thomson	256
3.1.1	Modèle de l'électron élastiquement lié.	256
3.1.2	Emission spontanée	257
3.1.3	Diffusion du rayonnement.	259
3.2	Modèle semi-classique	264
3.2.1	Rayonnement d'un atome quantique	264
3.2.2	Diffusion du rayonnement	266
3.3	Diffusion par un milieu dense	276
3.3.1	Notations. Champ diffusé.	276
3.3.2	Cas d'un milieu homogène	279
3.3.3	Diffusion par un cristal	280
3.3.4	Diffusion par un milieu désordonné	282
3.3.5	Influence de la dynamique du milieu	283
	Appendice 1 Réaction de rayonnement: modèle d'Abraham-Lorentz	287
V	Electromagnétisme dans la matière	291
1	Equations de Maxwell dans la matière	295
1.1	Champs et charges microscopiques et macroscopiques	295
1.2	Distributions moyennées	296
1.2.1	Densités microscopiques	296
1.2.2	Moments multipolaires	297
1.2.3	Densités macroscopiques	298
1.2.4	Expression des densités de charges liées	299
1.3	Equations de Maxwell macroscopiques	303
1.3.1	Déplacement électrique, Induction magnétique	304
1.3.2	Considérations énergétiques	305

2 Réponse linéaire	307
2.1 Susceptibilités	308
2.2 Polarisabilité électrique	310
2.2.1 Polarisabilité induite	310
2.2.2 Polarisabilité d'orientation	310
2.3 Polarisabilités magnétiques	312
2.3.1 Diamagnétisme	312
2.3.2 Paramagnétisme	314
2.4 Lien entre polarisabilité et susceptibilité	316
2.4.1 Cas électrique	316
2.4.2 Cas magnétique	319
2.5 Perméabilité et permittivité relatives	321
2.5.1 Définitions et équations de Maxwell	321
2.5.2 Considérations énergétiques	322
2.6 Relations de Kramers–Krönig	324
3 Propagation dans les milieux linéaires	327
3.1 Equations de propagation	327
3.2 Milieux diélectriques	328
3.3 Milieux conducteurs	330
3.3.1 Modèle de conductivité	330
3.3.2 Propagation très basse fréquence	332
3.3.3 Propagation haute fréquence	333
3.3.4 Régime intermédiaire	333
3.3.5 Ondes de Plasma	335
3.4 Relations de passage	336
3.4.1 Conditions aux limites	336
3.4.2 Passage entre deux milieux diélectriques	337

Chapitre 1

Introduction générale

Le programme du module L3 du Magistère Interuniversitaire de Physique couvre essentiellement l'électromagnétisme avancé et la relativité restreinte.

Il n'est peut être pas utile de justifier longuement, à ce niveau, l'intérêt d'un cours d'électromagnétisme. Il s'agit d'une des quatre interactions fondamentales dont nous pensons qu'elles suffisent à expliquer l'ensemble des interactions observées à toutes les échelles, depuis les structures du proton ou du neutron, jusqu'à celles des amas de galaxies. Parmi ces quatre interactions, l'électromagnétisme jouit d'un statut remarquable. Il est d'abord responsable de la stabilité de l'édifice atomique, de toutes les réactions chimiques. C'est aussi souvent par l'intermédiaire d'interactions électromagnétiques que nous pouvons acquérir des informations sur le monde qui nous entoure. C'est essentiellement un problème d'électromagnétisme que d'explorer la structure du proton par des électrons de haute énergie. C'est aussi dans le domaine de l'optique, visible, infrarouge ou micro-onde, que nous pouvons explorer la structure de l'univers et remonter aux premiers stades de sa formation. Enfin, l'électromagnétisme, dans sa forme la plus achevée, l'électrodynamique quantique, est sans doute la théorie physique la mieux vérifiée et la plus sûre aujourd'hui. Les techniques modernes de théorie des champs appliquées à l'électromagnétisme permettent en effet de prédire des quantités physiquement mesurables, telles que le célèbre facteur gyromagnétique anormal de l'électron (plus connu sous le nom de $g - 2$) ou les déplacements de Lamb de l'atome d'hydrogène avec des précisions pouvant atteindre 10^{-11} , limitées essentiellement à ce niveau par notre connaissance imparfaite de la structure des hadrons (protons et autres nucléons).

Il faut voir aussi, d'un point de vue plus historique, que l'électromagnétisme a joué un rôle essentiel, au début de ce siècle, dans le développement de la physique moderne. C'est en fait par ses incompatibilités avec les théories antérieures que l'électromagnétisme a contribué à renouveler totalement notre vision du monde. La première de ces incompatibilités est celle de l'électromagnétisme avec la thermodynamique classique. Quand on a essayé, à la fin du siècle dernier, de calculer à partir de la toute nouvelle théorie de Maxwell (1865) le spectre du rayonnement d'un corps noir (totalement absorbant) en équilibre thermodynamique, on s'est heurté à une difficulté en apparence insurmontable. Les lois classiques (loi de Rayleigh-Jeans par exemple), établies simplement à partir des équations de Maxwell et de considérations énergétiques, prévoient en effet un rayonnement de puissance infinie, avec un spectre divergeant aux hautes fréquences, ce qui n'est (heureusement) pas vérifié expérimentalement. Ce n'est qu'en 1900 que Planck résolut le problème en quantifiant (sans vraiment croire à une authentique nature quantique de la matière ou du rayonnement) les échanges d'énergie matière-rayonnement. En fait, la nature corpusculaire du rayonnement ne sera établie sur des arguments convaincants que par Einstein, qui analyse en 1905 les fluctuations d'un rayonnement en équilibre thermodynamique et identifie un terme similaire à celui qu'on obtient pour un gaz de particules. Il découvre ainsi le photon (le nom n'apparaîtra que bien plus tard) et interprète en ces termes les propriétés de l'effet photoélectrique. Cette idée de quantifier les grandeurs classiques devait, bien sûr, conduire ensuite à la formulation moderne de la physique quantique.

L'incompatibilité de l'électromagnétisme de Maxwell avec la cinématique classique a joué, elle aussi, un rôle essentiel qui sera largement illustré dans ce cours. Les équations de Maxwell prédisent, comme chacun sait, une propagation d'ondes électromagnétiques avec une vitesse universelle, c . La cinématique classique impliquant la loi standard de composition des vitesses, l'opinion communément répandue à la fin du siècle dernier était que cette vitesse était relative à un milieu immatériel remplissant tout l'espace, l'éther. Ce milieu n'a pas tardé à poser quelques problèmes. Il fallait d'abord qu'il soit pratiquement immatériel, pour se laisser traverser sans friction apparente par les planètes. Il fallait en même temps qu'il soit extrêmement rigide pour transmettre des vibrations transverses à grande vitesse. Plus encore, cet éther posait des problèmes d'ordre plus philosophique, en réintroduisant un référentiel absolu. Enfin, l'hypothèse de l'éther s'effondra tout à fait quand les expériences de Michelson, justement célèbres, montrèrent que l'éther semblait immobile par rapport à la terre. A moins d'en revenir à un anthropocentrisme intolérable ou d'inventer des modifications ad hoc complètement artificielles de la théorie (entraînement de l'éther par les masses en mouvement, par exemple), il n'y avait plus comme issue que d'inventer la relativité restreinte (en 1905) en renouvelant complètement les bases de la cinématique et de la dynamique, avec des conséquences philosophiques importantes (abandon de l'universalité du temps), puis la relativité générale, qui donne de la gravitation une interprétation complètement géométrique. Il est assez remarquable, d'ailleurs, que les deux incompatibilités que nous venons de discuter aient conduit à deux théories (relativité générale et mécanique quantique) parfaitement vérifiées dans la limite des expériences actuelles mais encore incompatibles, en dépit des efforts de générations de physiciens.

La dernier rôle historiquement important de l'électromagnétisme est plus récent. Dès la formulation de la mécanique quantique moderne, au début des années 30, on a tenté de quantifier le champ électromagnétique et de retrouver ainsi rigoureusement la quantification heuristique de Planck. Si tout se passe bien avec les procédés de quantification standard (le terme adéquat est "canonique") quand on ne considère qu'un mode du rayonnement (une seule onde plane, par exemple), les choses se gâtent quand on veut tenir compte de toutes les fréquences et de toutes les directions de propagation. Il apparaît alors des infinis dans le calcul de toute quantité physique. Ce n'est que relativement récemment (1947 environ) qu'on a pu se débarrasser systématiquement de ces infinis. Ces techniques, en particulier la renormalisation, mises au point pour l'électromagnétisme, ont depuis joué un rôle essentiel dans la théorie des champs, puisqu'on ne sait pratiquement, encore aujourd'hui, traiter que les théories renormalisables.

Il n'est bien entendu pas possible d'aborder ces problèmes dans un cours de licence. Nous nous contenterons d'étudier certaines propriétés de l'électromagnétisme classique (de Maxwell) qui ne sont que très partiellement abordées dans les classes "élémentaires" et de discuter des liens profonds entre électromagnétisme et relativité restreinte. A ce programme relativement ambitieux, il a été décidé récemment d'ajouter un bref chapitre de mécanique analytique. Il s'agit en effet d'une formulation élégante et puissante de la dynamique newtonienne classique, qui nous sera fort utile, dans le cours de relativité restreinte, pour montrer que l'électromagnétisme de Maxwell est en fait une des dynamiques relativistes les plus simples que l'on puisse construire avec une interaction champ-matière non triviale. Cette introduction sera également utile pour éclairer le cours de physique statistique classique, dans laquelle la fonction de Hamilton de la mécanique classique joue un rôle essentiel. Enfin les formulations lagrangiennes et hamiltoniennes de la mécanique classique jouent un rôle essentiel en mécanique quantique, en fournissant les techniques nécessaires pour un passage rigoureux d'une théorie classique à la théorie quantique correspondante (la fameuse quantification canonique évoquée plus haut). Certains des objets du formalisme de la mécanique quantique correspondent d'ailleurs de très près à des analogues en mécanique analytique. Les commutateurs ne sont que la version matricielle des crochets de Poisson que nous introduirons dans cette première partie sur la mécanique analytique. Nous concluons cette partie par un appendice sur le modèle de Bohr de la structure atomique. Il s'agit en effet d'un modèle, fondé sur des concepts de mécanique analytique, qui nous sera fort utile pour des discussions qualitatives dans la suite du cours.

La deuxième partie du cours sera consacrée à la relativité restreinte. Nous essaierons de montrer pourquoi l'électromagnétisme de Maxwell est incompatible avec la cinématique de Galilée ou de Newton. Nous construirons alors, en nous fondant sur des hypothèses très simples et naturelles, une nouvelle cinématique. Nous devons donc reconstruire aussi la dynamique des particules matérielles. Nous chercherons alors à construire une théorie décrivant l'interaction de particules matérielles par l'intermédiaire d'un champ. Nous prendrons la forme la plus simple possible pour les fonctions de Lagrange décrivant ce champ et son interaction avec la matière. En utilisant les résultats de mécanique analytique, nous montrerons alors que la théorie ainsi construite n'est autre que l'électromagnétisme de Maxwell! Nous aurons ainsi bouclé la boucle mais montré surtout que la formulation de Maxwell, arrivée 40 ans avant la relativité, est naturellement relativiste. Nous obtiendrons enfin, en utilisant cette approche relativiste, un certain nombre de résultats de pur électromagnétisme, en particulier sur les bilans d'énergie–impulsion du champ, particulièrement pénibles à obtenir par d'autres méthodes.

La troisième partie du cours sera consacrée aux phénomènes de propagation et de diffraction des champs électromagnétiques. Nous donnerons en particulier explicitement la solution des équations de Maxwell en termes de potentiels retardés. Cette démonstration, outre son importance, fait intervenir la technique très puissante des fonctions de Green, qui sont d'un usage courant dans de nombreux domaines de la physique et qui jouent un rôle essentiel dans l'établissement de la théorie rigoureuse de la diffraction. Le deuxième chapitre de cette partie sera donc consacré à une discussion détaillée de la théorie rigoureuse de la diffraction. Nous montrerons quelle est la démarche pour passer des équations de Maxwell à l'approximation de Fraunhofer de la diffraction paraxiale, telle qu'elle est enseignée dans les classes élémentaires. Le troisième chapitre de cette partie sera consacré à une discussion rapide et très qualitative de quelques applications de la diffraction dans le domaine de traitement optique du signal. Ce chapitre sera suivi de quatre appendices qui pourront être ignorés en première lecture. Le premier traitera les problèmes de choix de jauge. Si la relativité impose une jauge, il en est d'autres qui peuvent être utiles pour des problèmes où l'invariance relativiste peut être temporairement masquée. Dans le second, nous explorerons l'analogie formelle entre le rayonnement et l'oscillateur harmonique, en introduisant les variables normales du champ. C'est là un étape essentielle vers la quantification du rayonnement, que nous évoquerons très brièvement et qualitativement. Le troisième, en application directe des principes de la diffraction, traitera des faisceaux gaussiens, essentiels en optique laser. Enfin, le quatrième montrera comment l'optique géométrique peut être déduite de l'électromagnétisme quand on ne s'intéresse qu'à des champs variant lentement à l'échelle de la longueur d'onde.

Nous nous pencherons ensuite, dans la quatrième partie, sur le problème du calcul des champs rayonnés par divers types de sources. Si la solution en termes de potentiels retardés est parfaitement explicite, elle n'est guère manipulable dans la plupart des cas. Nous nous occuperons essentiellement dans ce chapitre de trois types de sources. Nous commencerons par examiner le rayonnement produit par une charge en mouvement (éventuellement relativiste) imposé. Nous pourrions ainsi nous pencher sur le problème du rayonnement de freinage et de la réaction de rayonnement essentiels dans la description des accélérateurs de particules et dans celle de l'interaction de particules chargées énergétiques avec la matière. Nous pourrions aussi traiter le rayonnement du dipôle électromagnétique, constitué d'une simple charge oscillant de façon sinusoïdale au voisinage de l'origine. En raison de l'importance de ce cas, nous expliciterons le calcul du champ à des distances arbitraires. Nous examinerons, dans le deuxième chapitre, des répartitions de courants classiques oscillants (des antennes) que nous traiterons par la technique des développements multipolaires, en étudiant en détail les dipôles et quadripôles électriques ainsi que les dipôles magnétiques, qui joueront un rôle essentiel dans la partie suivante. Nous nous pencherons enfin, dans le dernier chapitre, sur le rayonnement de sources atomiques et nous étudierons en particulier la diffusion de la lumière par un atome unique. Nous montrerons, en les comparant explicitement, qu'un modèle classique très simple donne des résultats qualitativement très comparables à celui d'un modèle quantique beaucoup plus rigoureux. Nous montrerons néanmoins où sont les limites de ce traitement ignorant le caractère quantique du champ, en discutant en particulier d'expériences récentes.

La cinquième partie sera consacrée aux champs électromagnétiques dans la matière. Nous montrerons d'abord comment on peut se débarrasser, par des procédures de moyennage appropriées et l'introduction de nouveaux champs, de la formidable complexité des répartitions de charges dans la matière dense. Nous verrons comment la théorie de la réponse linéaire permet d'éliminer de ces champs supplémentaires. Nous l'aborderons ici pour la première fois les méthodes de réponse linéaires applicables, sous des formes diverses, à des domaines très variés, de la mécanique quantique au traitement du signal. Nous nous pencherons alors sur la notion de susceptibilité, qui décrit tout autant les phénomènes dispersifs dans le milieux transparents (l'indice de réfraction), que les échanges d'énergie. Nous montrerons comment la causalité introduit des relations très belles et très fondamentales entre dispersion et absorption. Là encore, ces relations sont d'un champ d'application beaucoup plus large que l'électromagnétisme qui nous fournira une première occasion de les aborder.

Nous supposerons connues dans ce polycopié et dans le cours, un certain nombre de notions.

- **Mécanique du point:** notion de vitesse, accélération, référentiel, changement de référentiel galiléen, principe fondamental, énergies cinétiques et potentielles, moment cinétique.
- **Electrostatique:** champ, potentiel, théorème de Gauss, utilisation des propriétés de symétrie, énergie électrostatique. Notions d'électrostatique des conducteurs.
- **Magnétostatique:** champ, potentiel vecteur, théorème d'Ampère, utilisation des propriétés de symétrie, énergie magnétostatique.
- **Electrodynamique:** équations de Maxwell, conditions de Jauge, propagation, notion d'onde plane, polarisation, potentiels retardés, énergétique des champs électromagnétiques dans le vide (densité d'énergie et vecteur de Poynting). Quelques notions sur l'électrodynamique des milieux matériels
- **Optique:** quelques notions élémentaires d'optique géométrique, interférences et diffraction dans la limite de Fraunhofer.
- **Mathématiques:** calcul vectoriel, analyse vectorielle (gradient, divergence, rotationnel...), intégration, différents systèmes de coordonnées (cartésien, cylindrique, sphérique), bases d'algèbre linéaire, équations différentielles élémentaires. Séries de Fourier et transformées de Fourier

Ce polycopié est en fait relativement plus complet que le cours lui même, dont la durée limitée ne permet pas de traiter en détails tous les sujets énumérés ici. Pour approfondir encore d'avantage le sujet, on pourra recourir à de nombreux manuels. Pour ce qui est de la mécanique analytique, nous recommandons le Landau (Mécanique), très sec mais très complet, et le Goldstein (Mécanique classique) que l'on peut trouver en versions anglaise et traduite. C'est un livre très (trop?) complet. Il est de loin préférable de lire une édition récente, les anciennes étant un peu poussiéreuses. Pour la relativité, il existe une infinité de manuels. On pourra se référer, là encore au Landau (théorie des champs) si on n'est pas rebuté par le style de cet ouvrage et les notations, un peu anciennes. Il n'est pas inutile non plus de regarder les articles originaux d'Einstein. Un article de revue de 1907, en particulier, que l'on trouvera traduit dans la récente édition d'une sélection d'articles (édition Einstein, Relativités I, Seuil CNRS), est un modèle de pédagogie et ferait un excellent manuel.

Pour tout ce qui concerne les problèmes d'électromagnétisme et aussi pour la relativité il est indispensable d'avoir au moins parcouru le Jackson (Classical Electrodynamics). Ce très beau et très gros livre est la bible du domaine. Il est extrêmement exhaustif et d'une lecture suffisamment facile (surtout les éditions récentes). En fait, il pourrait à lui seul remplacer 80% de ce polycopié, dont certains chapitre sont fortement inspirés. Son seul défaut est l'utilisation exclusive du système d'unités CGS/UES, ce qui fait que les équations ne sont que difficilement reconnaissables pour des européens habitués au système dit international. Fort heureusement, Jackson fournit, dans un appendice très intelligemment conçu, les règles de transformation qui sont finalement assez simples. Pour l'optique

(diffraction, aspects ondulatoires, problèmes de cohérence, de polarisation) on pourra consulter avec profit le Born et Wolf, vieux manuel ennuyeux mais extraordinairement exhaustif.

Remerciements

Ce polycopié doit beaucoup, pour la partie de pur électromagnétisme, à un polycopié rédigé il y a quelques années par S. Haroche, pour ce qui était alors le cours M3 du MIP. Il doit aussi énormément aux "caïmans" qui m'ont assisté dans les dernières années: M. Benamar, M.C. Angonin, J.M. Daul, C. Dupraz, L. Rezeau et J. Hare. Ce dernier, en particulier, a consacré beaucoup de temps à la relecture attentive du manuscrit et a suggéré de nombreuses améliorations. Je remercie également E. Reyssat, élève de la promotion 1999, qui a relevé de nombreuses erreurs typographiques.